

영전압 스위칭을 이용한 고역률 3상 AC-DC Flyback 컨버터 모듈

이종필*, 최주엽**, 송중호**, 최 익**, 윤태웅*
 *고려대학교 전기공학과 **한국과학기술연구원 지능제어연구센터

High Power Factor Three-phase AC-DC Flyback Converter Module
 Using Zero Voltage Switching

J.P.Lee*, J.Y.Choi**, J.H.Song**, I. Choy**, T.Y.Yoon*

*Dept. of Electrical Eng. Korea Univ. **KIST Intelligent System Control Research center

Abstract - A new mode of parallel operation of a modular 3-phase AC-DC Flyback converter for high power factor correction along with tight regulation is presented in this thesis. The converter offers input/output transformer isolation for safety, a unity input power factor for minimum reactive power, high efficiency and high power density for minimum weight and volume. Compared with previously developed 3-phase two-stage power converter, the advantage of the proposed converter does not require expensive high voltage and high current devices that are normally needed in popular boost type 3-phase converter. In this paper, a detailed small signal analysis of the modular 3-phase AC-DC flyback converter is provided for control purposes and also experimental results are included to confirm the validity of the analysis.

게 줄여 전체적인 시스템의 효율을 극대화하였다. 그림 1은 제안한 컨버터의 개략도이다.

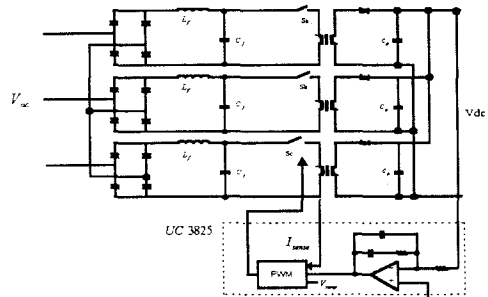


그림 1. 제안한 3-module Flyback 컨버터

고주파 필터가 다이오드 브리지 후단에 연결되어 있다. 그리고 인덕터 성분을 가지고 있는 트랜스포머는 입력과 출력을 절연시키고 강압(step down) 역할을 한다. 또한 출력단은 병렬로 캐패시터가 구성되어 있다.

1. 서 론

SMPS의 사용범위 중 현재 통신전원용과 같은 대전력, 고전압 응용분야는 3상 AC-DC 컨버터가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 AC-DC 컨버터의 경우에 입력 전류의 왜곡을 저감시키고, 단위 역률을 실현시키게 되면 수전 설비의 필요 없는 용량증가를 방지하는 효과가 있다. 또한 기기의 보호를 위하여 입력단과 출력단을 절연시키고 기기의 고효율화에 따른 소형화는 전원시스템의 필수적인 요건으로 인식되고 있다. 최근의 연구는 위에서 언급한 요건을 만족시키기 위해 아날로그 제어방법보다는 뛰어난 성능을 보이는 디지털 제어를 이용한 3상 컨버터가 개발되고 있으나[1,2,3], 구현하는데 복잡하고 제품 원가가 비싸다는 단점이 있다.

제안한 컨버터는 단상 및 3상 겸용 컨버터와 비교하면 아날로그 방식의 PWM 전용 칩 한 개만을 사용함으로써 뛰어난 성능을 보여준다[4,5]. 또한 제안한 방식은 3모듈로 구성되어 있으므로 이상이 생길 경우 모듈별로 교체할 수 있으므로 수리 보수의 간편함을 제공한다. 그리고 3상 3선식과 4선식의 시스템에 함께 적용할 수 있으므로 설치 장소의 사양에 맞추어서 사용할 수 있다. 또한 기존의 3상 시스템에서는 고전압, 대용량의 스위칭 소자를 써야 하고 2단계로 구성되어 있는 반면 제안한 컨버터는 각 모듈에서 저전압과 소전류로 분담하는 효과가 있고 1단계로 구성되므로 적은 소자 수를 사용하여 훨씬 경제적이다 할 수 있다. 또한 소프트 스위칭 기법을 첨가하여 스위치의 손실 및 EMI 현상을 크

2. 본 론

2.1 3상 AC-DC Flyback 컨버터

SMPS(switched mode power supply)의 사용범위가 급증하면서 안정성과 우수한 동특성을 가지는 컨버터의 요구가 증대되고 있다. 위의 요구를 만족시키기 위해서는 컨버터의 적절한 제어가 필수적이고 컨버터의 소신호 해석이 선행되어야 한다. 상태공간 평균화기법을 사용하여 3상 3 모듈 Flyback 컨버터의 듀티율대 출력 전압의 전달함수를 주파수 영역에서 유도한 결과는 아래와 같다.

$$T_s(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)x + (B_1 - B_2)w] + [C_1 - C_2]x = \frac{R(|v_d| + |v_d| + |v_d|)}{s^2(RL/C_o) + s(L + RC_o) + 3R}$$

여기서 제안한 3상 3-module Flyback 컨버터는 3개의 스위치의 동작이 동시에 켜지고 꺼지며 위에서 구한 전달함수도 DC-DC 컨버터의 형태를 가지므로 일반적인 3상 AC-DC 컨버터에서의 복잡하고 특별한 제어방법보다 DC-DC 컨버터에서 적용한 간단한 제어방법을 사용하여 구현할 수 있다.

그림 2는 컨버터에 적용된 제어 구성도이다.

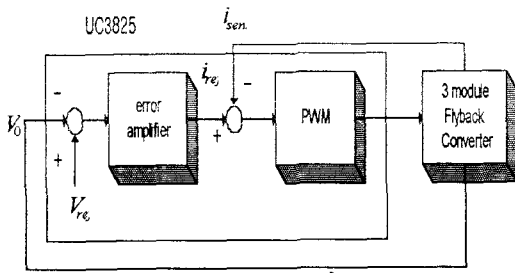


그림 2. 제어 구성도

2.2 소프트 스위칭 기법 적용

그림 3에서는 본 논문의 Flyback 컨버터에 적용한 액티브 클램프 회로를 나타냈다. 여기서 주 전력 회로의 외부에 공진 요소를 첨가한 보조 회로를 이용하여 부가적인 순환 에너지의 증가 없이 넓은 부하 영역에 있어서 영전압 스위칭을 확보해 줄 수 있으며 액티브 클램프 회로를 사용하여 스위치 턴 온과 턴 오프 시에 발생하는 전압 스파이크(spike)를 클램프 시켜 스위치 손실을 크게 줄였다. 또한 변압기의 누설 에너지를 재활용하여 S_1 과 S_2 스위치 모두 영전압(ZVS) 스위칭이 가능하게 한다. 제안한 컨버터는 7개 동작모드를 가지며 동작 파형은 그림 4에 나타내고 있다.

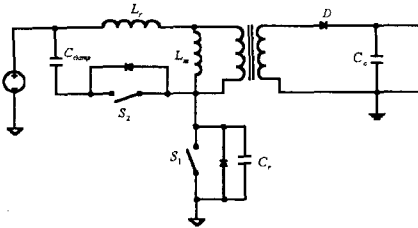


그림 3 액티브 클램프 Flyback 컨버터

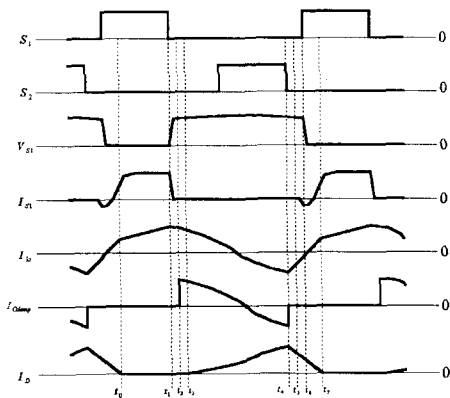


그림 4 액티브 클램프 Flyback 컨버터의 정상상태 파형

(1) 모드 1 ($t_0 \sim t_1$)

S_1 스witch는 도통되고 S_2 스switch는 꺼져있는 상태이다. 출력단 다이오드 D 는 역 바이어스 상태이므로 변압기의 자화 인덕터와 L_p 에 에너지가 선형적으로 충전된다.

(2) 모드 2 ($t_1 \sim t_2$)

t_1 에서 S_1 스switch가 턴 오프되고 모드1에서 L_p 에 충전되어 있던 에너지에 의해서 C_r 이 충전되기 시작한다.

(3) 모드 3 ($t_2 \sim t_3$)

t_2 에서 C_r 전압은 $V_{in} + NV_o$ 까지 충전을 하고, S_2 의 역 병렬 다이오드는 도통되기 시작한다. 그리고 변압기 자화 인덕터에 걸리는 전압 V_{pri} 는 출력전압이 증가함에 따라 감소한다 :

$$V_{pri} = -V_o \frac{L_m}{L_r + L_m} \quad (2-1)$$

(4) 모드 4 ($t_3 \sim t_4$)

t_3 에서 출력단 다이오드 D 를 순방향 바이어스로 시키기 위해 V_{pri} 전압이 감소된다. 이때 V_{pri} 전압은 출력단 캐패시터의 영향으로 NV_o 로 클램프 된다. 또한 C_{clamp} 와 L_r 은 공진을 시작하며 S_2 스switch를 영전압 스위칭하기 위해 I_{clamp} 가 음으로 떨어지기 전에 스위칭을 한다.

(5) 모드 5 ($t_4 \sim t_5$)

t_4 에서 보조 스위치 S_2 가 턴 오프 된다. 이때 L_r 와 스위치의 기생 캐패시터와 공진을 한다. C_r 이 방전을 하므로 V_{pri} 는 NV_o 로 계속 클램프 되어 있다.

(6) 모드 6 ($t_5 \sim t_6$)

t_5 에서 C_r 이 충분히 방전하면 S_1 의 바디 다이오드는 도통되기 시작한다. 또한 공진 인덕터의 전압은 $V_{in} + NV_o$ 로 클램프되어 있고 출력단 다이오드는 다음과 같이 감소하기 시작한다 :

$$\frac{di_D}{dt} = -N \left(\frac{NV_o}{L_m} + \frac{V_{in} + NV_o}{L_r} \right) \quad (2.2)$$

이때, 스위치 S_1 은 영전압 상태에서 턴 온 할 수 있다.

(7) 모드 7 ($t_5 \sim t_6$)

스위칭 S_1 이 턴 온되고 공진 인덕터 전류가 증가함에 따라 2차측 전류는 감소한다. t_7 일 때 2차측 전류는 영이 되고 출력단 다이오드는 역 방향 바이어스 된다. 또한 공진 인덕터와 자화 인덕터는 다시 모드1에서의와 같이 선형적으로 에너지가 충전된다. 모드 7로 한 주기의 동작이 끝나게 되며 다음주기는 다시 모드 1의 과정을 반복한다.

2.3 실험 결과

실험조건 및 계측기는 아래와 같다.

필터 인덕턴스 (L_f) : 2.4mH,

필터 캐패시터 (C_f) : 5 μ F

스위칭 주파수 (F_s) : 100kHz

출력 용량 : 1.5kW

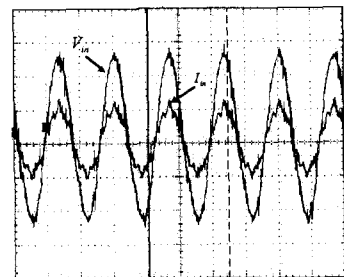
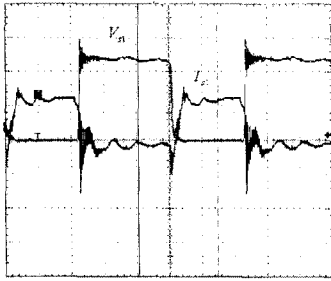


그림 7. 제안한 Flyback 컨버터의 입력전압 및 전류 파형

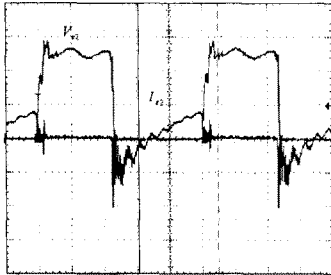
($V_a = 200V/div., I_a = 2A/div.$)

그림 7은 입력전압과 전류의 파형인데 역류이 거의 단

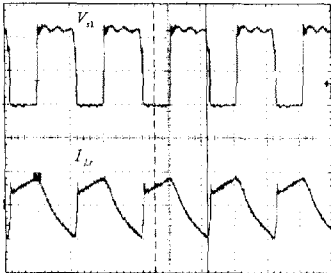
위역률을 유지함을 볼 수 있다. 그림 8과 9는 주스위치와 보조 스위치의 드레인과 소스의 전압과 전류 파형이고 예상대로 영전압 스위칭을 보여준다. 따라서 스위치에서 발생하는 손실이 현저히 줄어드는 것을 예상할 수 있다.



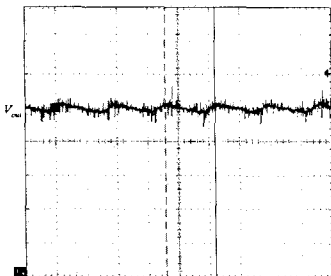
(V_{S1} : 50V/div., I_{S1} : 2A/div., Time: 2 μ s/div.)
그림 8 주스위치 전압 및 전류 파형



(V_{S1} : 50V/div., I_{S1} : 2A/div., Time: 2 μ s/div.)
그림 9 보조스위치 전압 및 전류 파형



(V_{S1} : 50V/div., I_{Lr} : 2A/div., Time: 5 μ s/div.)
그림 10 V_{S1} 전압 및 I_{Lr} 전류 파형



(2V/div., Time: 2ms/div.)
그림 11 출력전압 파형(100%부하)

3. 결 론

본 논문은 SMPS분야 중 통신전원용으로 많이 사용되는 AC-DC 컨버터의 제어의 안정성, 컨버터의 효율 및 출력전압에 있어서 양질의 전원을 공급하기 위해서 모듈화된 3상 AC-DC Flyback 컨버터에 대해 연구하였다. 컨버터의 상대공간 평균화 기법을 통한 모델링을 통해 DC-DC 컨버터에서 적용하였던 전류제어기법을 하나의 아날로그 PWM 전용칩을 사용하여 구현하였다. 또한 기존의 컨버터가 가지는 복잡한 역률 제어회로가 필요 없이 3상 3선식과 4선식 모두 단위 역률을 구현하였다.

SMPS의 가장 큰 단점인 스위치에서의 손실을 줄이기 위해서 소프트 스위칭 기법을 적용하였다. 이를 실현하기 위해서 보조 스위치, 공진 인덕터와 공진 캐패시터 그리고 변압기에서 손실로 작용하는 누설 인덕턴스를 이용하여 주 스위치 및 보조 스위치 모두 ZVS를 이루므로 스위치에서 발생하는 여러 가지 악영향을 제거하였으며 스위치의 이용률을 극대화 시켜 전체 시스템의 효율을 증가 할 수 있었다.

3상의 컨버터를 병렬로 모듈화하여 각 모듈에서 적은 전압과 전류로 분담하게 하여 가격면에서 기존의 3상 컨버터 보다 훨씬 경제적인 소자를 결정할 수 있다. 또한 독립적인 모듈로 구성되어 있으므로 높은 신뢰성과 쉬운 testing을 제공하므로 수리 보수에 간편함을 제공한다.

그리고 벡(buck), 풀브리지(full bridge)와 같은 컨버터에도 모듈화를 적용하여 구현할 수 있고 실제 단가를 낮추어야 하는 산업계에서 널리 적용 할 수 있는 방법이라 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Busse, J. Holtz, "Multiloop control of a unity power factor fast switching ac to dc converter", Proc. of IEEE PESC, pp. 171-179, 1982
- [2] L. Malesani, P. Tenti "Three-phase ac/dc PWM converter with sinusoidal input currents and minimum filter requirements", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-23, no 1, pp. 71-77, 1987
- [3] V. Vlatkovich, D. Boroyevish, "Digital signal processor based control of three-phase, space vector modulated converter", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. IE-41, no 3, pp 148-157, 1995
- [4] M.J. Kocher, R.L. Steigerwald, "An AC to DC converter with high quality input waveforms", IEEE Trans. Power Electronics, pp 63-75, 1982
- [5] J.Y. Choi, H.S. Mok, T.Y. Kim, "A single phase/Three-phase compatible soft-switched AC to DC converter", Proc. of seventh European Conference on power electronics and applications, pp 464-469, 1997
- [6] J.Y. Choi, J.P. Lee, I. Choy and J.H. Song "A New Modular 3-phase AC-DC Flyback Converter for Telecommunication", International Telecommunications Energy Conference. INTELEC'98, pp 476-482
- [7] Guichao Hua, Fred C. Lee, "Soft-Switching Techniques in PWM Converters", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 42, no. 6, 1995
- [8] I. Matsuura, K.M. Smith, K.M. Smedley, "A Comparison of Active and Passive Soft Switching Methods for PWM converters" IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 94-100, 1998
- [9] Deepak Divan, "Low-stress switching for efficiency", IEEE Spectrum pp. 33-39, December 1996